

ISSN 0104-1347

Balanco de radiação em área de pastagem na Amazônia

Radiation balance over on Amazonia pasture site

José Alexandre da Costa Galvão¹ e Gilberto Fisch²

Resumo - Medidas micrometeorológicas de superfície realizadas na área de pastagem do Projeto ABRACOS foram utilizadas para avaliar o balanço completo de radiação e o desempenho de fórmulas empíricas para estimativas da radiação de onda longa atmosférica (L_a), para o final da estação chuvosa e início da estação seca do ano de 1993, na região de Ji-Paraná (RO). De um modo geral, os componentes do balanço de radiação apresentam um ciclo diário bem definido com os valores mais elevados ocorrendo durante o período diurno e os menores durante a noite. As estimativas de radiação de onda longa da atmosfera, a partir desses modelos, subestimaram as observações, resultando em valores de desvio médio quadrático (DMQ) variando entre 50,7 a 75,2 Wm⁻², assim como valores negativos de erro médio absoluto (EMA) de -73,0 a -49,1 Wm⁻². Um ajuste local dos coeficientes das fórmulas empíricas utilizadas foi realizado, obtendo-se as melhores estimativas de L_a pelos modelos em que a emissividade é função somente da temperatura do ar. Os índices estatísticos das equações ajustadas mostraram coeficientes de correlações (R^2) próximos à unidade, pequenos valores de DMQ e EMA próximos de zero.

Palavras-chave: Amazônia, pastagem, balanço de radiação, radiação de onda longa atmosférica, fórmulas empíricas

Abstract - Micrometeorological observations of the Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study (ABRACOS) have been used to study the radiation budget and to test the validity of several empirical methods used for estimating long-wave atmospheric radiation. The experimental site is a pasture at Ji-Parana (RO) during the end of the wet season and the begin of the dry season of 1993. In the main, the radiation balance components presented diurnal cycle well defined with higher values occurring in the diurnal period and lower values during night time. The performance of 5 methods for estimating the long-wave atmospheric radiation flux (L_a) were tested for a pasture site in Amazon. The estimates of L_a from these methods underestimate the observed values. The root mean square error ranges from 50.7 to 75.2 Wm⁻². The values of the mean bias error are negative and range from -73.0 to -49.1 Wm⁻². This can be associated to the coefficients used by empirical equations, since they are specific to the place in which they had been developed. A local adjustment of these coefficients were made. Thus, much better estimates of L_a were obtained by methods in which the emissivity is only function of the temperature. The statistical tests of the adjusted equations show correlation coefficients near of unit, smaller values of root mean square error and mean bias error near to zero.

Key words: Amazon, pasture, radiation budget, long-wave atmospheric radiation flux, empirical equations

¹Meteorologista, M.Sc. em Meteorologia INPE - WM7 Meteorologia S/CI Ltda Tv. Ubirassanga, 50, Campo Belo, São Paulo, SP, 04614-050.
alex.galvao@bol.com.br

²Dr. Gilberto Fisch – Centro Técnico Aeroespacial (CTA/IAE-ACA), SJ Campos, SP. gfish@iae.cta.br

Introdução

Estudos envolvendo a radiação são importantes por ser esta a principal fonte de energia para os processos físicos e biológicos que ocorrem na biosfera (LEITÃO, 1994). Ao penetrar na atmosfera, a radiação solar sofre uma série de processos que a modificam. Uma considerável porção da radiação incidente é refletida pelas nuvens e difusamente espalhada pela atmosfera. Outras perdas ocorrem devido à absorção de radiação pelo ozônio, vapor d'água e dióxido de carbono. Mesmo assim, uma parte significativa atinge diretamente a superfície da Terra, sendo uma porção refletida e outra absorvida pela mesma. Um percentual da parte absorvida é reemitido como radiação termal, enquanto o restante aquece a superfície e o ar logo acima dela ou fornece energia para a evapotranspiração.

A radiação de onda longa é o fluxo radiante de energia resultante da emissão dos gases atmosféricos e de superfícies líquidas e sólidas da Terra. Todos os materiais sobre a Terra possuem uma temperatura mais baixa que a do Sol, tal que a radiação que eles emitem tem comprimentos de ondas maiores que a da radiação solar global. A maior parte da radiação emitida pela Terra e pela atmosfera está contida no intervalo de 4 a 100 μ m e por isto recebe a denominação de radiação de onda longa.

Embora haja instrumentos para medir a radiação de onda longa da atmosfera, esta não é uma medida fácil de se obter. Uma das razões deve-se ao fato que tais instrumentos emitem radiação de comprimento de onda e intensidade comparável aos da suposta medida. Entretanto, em muitas situações práticas em meteorologia, ainda é eficiente estimá-la baseando-se em observações de variáveis mais facilmente medidas (BRUTSAERT, 1982), ou por diferença e/ou resíduos, através da equação do balanço de radiação (ARYA, 1988), ou estimadas por várias equações, como por exemplo as equações de BRUNT (1932), BRUTSAERT (1975), IDSO & JACKSON (1969), SATTERLUND (1979) e SWINBANK (1963).

Na Amazônia praticamente não existem medidas regulares de radiação de onda longa da atmosfera, mesmo sendo esta uma variável importante no cálculo do balanço de radiação à superfície, pois representa a contribuição da atmosfera e engloba informações de nebulosidade e concentração de vapor d'água. Portanto, a utilização de equações empíricas para estimativa de radiação de onda longa da atmosfera tornou-se um modo alternativo largamente utilizado.

Atualmente os produtos oriundos de previsão numérica de tempo são largamente utiliza-

dos em previsão do tempo e clima, sendo que a determinação dos fluxos de calor sensível e latente nos modelos de Circulação Geral da Atmosfera são procedentes dos cálculos do balanço de radiação à superfície. A contribuição de onda longa é normalmente parametrizada nestes modelos, em alguns casos por fórmulas empíricas. Certamente uma melhor representação dos fluxos de onda longa nestes modelos melhorará os resultados obtidos.

Entre os estudos sobre o balanço de radiação de onda longa na floresta Amazônica, cita-se o realizado por MANZI et al. (1986), ANDRÉ et al. (1988), SÁ et al. (1988), BASTABLE et al. (1993), RIBEIRO (1994), CULF et al. (1996), FEITOSA (1996) e RESCHKE (1996). É importante ressaltar que estes resultados foram estimados por diferença ou resíduo a partir da equação do balanço de radiação. A análise do balanço de radiação apresentada neste trabalho é a única em que todos os componentes foram medidos diretamente e não estimados.

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento dos vários componentes do balanço de radiação e avaliar o desempenho de fórmulas empíricas na estimativa da radiação de onda longa atmosférica na área experimental de pastagem na região de Ji-Paraná (RO), durante a transição do final da estação chuvosa e início da estação seca do ano de 1993.

Material e métodos

O período de dados selecionado para este estudo foi o de 4 de abril a 26 de julho de 1993, período este correspondente ao final da estação chuvosa e ao início da estação seca na região sudoeste da Amazônia. Os dados utilizados foram registrados por Estações Climatológicas Automáticas (ECAs), instaladas em um sítio experimental do Projeto ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study), na área de pastagem de uma fazenda de pecuária (Fazenda Nossa Senhora Aparecida) localizada a 10°45'S, 62°22'W, a 293m acima do nível médio do mar, cerca de 15km da cidade de Ouro Preto D'Oeste, Rondônia, Brasil. A vegetação natural (floresta) foi totalmente substituída por gramínea (*Brachiaria brizantha*). Uma descrição detalhada do Projeto ABRACOS, dos sítios experimentais e das missões de campo encontram-se em GASH et al. (1996).

A ECA consiste de um solarímetro (Kipp e Zonen, Delft, Holanda) para medição de radiação solar global (no comprimento de onda de 0,3 a 3 μ m), um sensor similar, porém invertido, para medir a radiação solar refletida, ambos com erros de medidas estimados em $\pm 1\%$; um saldo radiômetro (Radiation

Energy Balance System, Seattle, Estados Unidos da América) para medir o saldo de radiação (de 0,3 a 50 μ m); termômetros de bulbos úmido e seco de resistência de platina (Didcot Instruments, Abington, Reino Unido), com uma precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ inseridos em um psicrômetro aspirado (Instituto of Hydrology, Reino Unido); anemômetros de conchas metálicas (Didcot Instruments, Abington, Reino Unido) com velocidade de partida de 0,3 à 0,4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; duas placas de fluxo de calor no solo (modelos 610 Thornthwaite, Elmer, New Jersey, Estados Unidos da América), instalados à profundidade de 5mm e um pluviôgrafo de balança com precisão de 0,2mm (Didcot Instruments, Abington, Reino Unido). Os dados foram registrados por um sistema de aquisição automática (data logger CR 10 da Campell Scientific, Shephed, Reino Unido) e armazenados em médias horárias.

A climatologia da região de Ji-Paraná mostra uma forte sazonalidade na distribuição da precipitação, com o período chuvoso (novembro-abril) apresentando totais mensais acima de 200 $\text{mm}\cdot\text{mês}^{-1}$. A estação seca estende-se de maio a outubro, com um período intenso de seca entre junho e agosto, com total mensal em torno de 20 $\text{mm}\cdot\text{mês}^{-1}$. A temperatura do ar, para o mesmo período, mostra também uma forte sazonalidade, sendo outubro o mês mais quente, com temperatura média de 25,6 $^{\circ}\text{C}$. O mês mais frio é julho, com temperatura média de 22,7 $^{\circ}\text{C}$. A Figura 1 mostra a distribuição climatológica de precipitação (a) e temperatura (b) de Ji-Paraná-RO para o período de 1982-1996, extraída de FERREIRA DA COSTA et al. (1998). Os meses de maio e junho marcam a transição entre o final do período chuvoso e o início da estação seca, assim como os meses de setembro e outubro indicam a transição entre o final da época seca e o início do período das chuvas.

A radiação de onda longa incidente (L_d) é um importante componente no balanço de radiação na superfície; porém é um

parâmetro difícil de ser medido ou calculado precisamente. Os valores de radiação de onda longa incidente foram estimados a partir das equações empíricas de a) BRUNT (1932), b) SWINBANK (1963), c) IDSO & JACKSON (1969), d) SATTERLUND (1979) e da equação analítica de e) BRUTSAERT (1975) [Eq. (1)-(5), respectivamente], a saber:

$$a) L_d = \sigma T^4 (0,51 + 0,06e^{1/2}) \quad (1)$$

$$b) L_d = 9,2 \times 10^{-6} \sigma T^6 \quad (2)$$

$$c) L_d = \sigma T^4 \{1 - 0,26 \exp[-7,77 \times 10^{-4} (273 - T)^2]\} \quad (3)$$

$$d) L_d = 1,08 \sigma T^4 [1 - \exp(-e^{T/2016})] \quad (4)$$

$$e) L_d = 1,24 \sigma T^4 (e/T)^{1/7} \quad (5)$$

onde T e e são a temperatura do ar (K) e a pressão de vapor (hPa) respectivamente, obtidas no nível de um abrigo meteorológico (1,5m de altura) e σ a constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$). As equações acima são empíricas, exceto a de BRUTSAERT [Eq. 5], que é derivada da equação de transferência radiativa

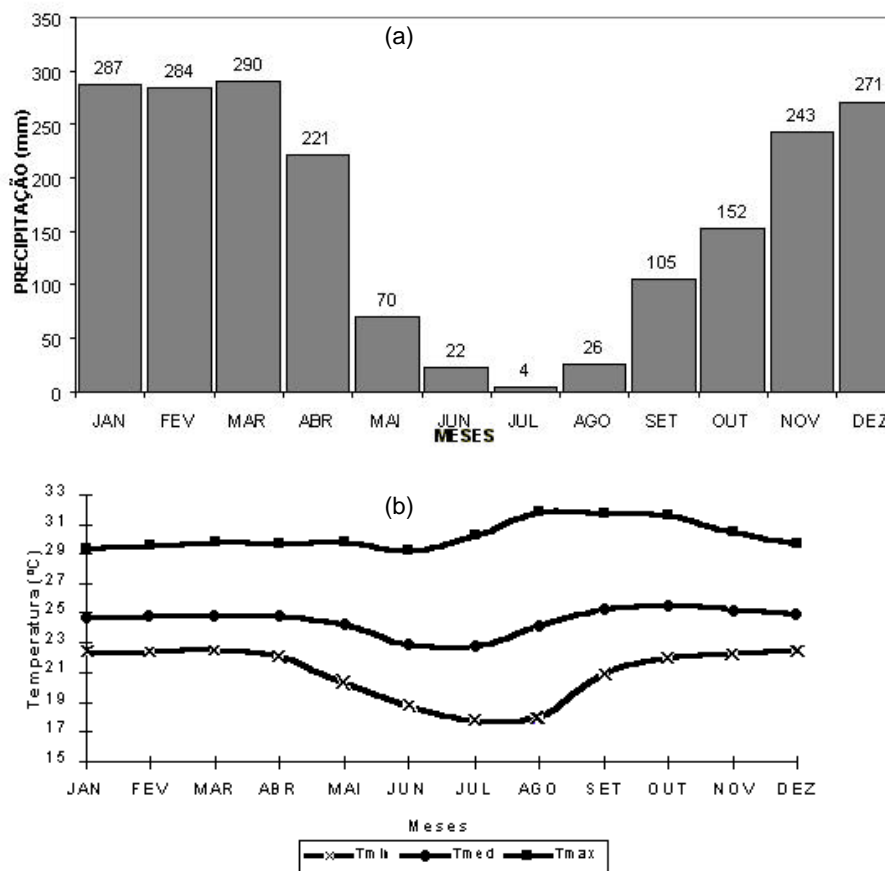


Figura 1 Valores médios de precipitação (a) e temperatura do ar (b) para a região de Ji-Paraná (RO), para o período de 1982 a 1996.

Fonte: FERREIRA DA COSTA et al. (1998).

de Schwarzschild para dias sem nuvens em condições atmosféricas próximas à da atmosfera padrão. Porém, os seus coeficientes também são ajustados para as condições locais.

Neste estudo, foram considerados dados de radiação de onda longa da atmosfera estimados a partir das equações descritas acima. Estes foram comparados com os valores medidos no sítio de pastagem. Estas medidas foram feitas através de um saldo radiômetro com a parte inferior do sensor isolado por uma cavidade preta (Figura 2). Através da equação do balanço de radiação, determinou-se L_d , anulando-se os termos provenientes da superfície (radiação solar refletida - R_{gr} e emissão de onda longa da superfície - L_u), acrescido de um termo de correção devido à emissão de energia da cavidade preta, usando a Lei de Stefan-Boltzmann. A temperatura desta cavidade foi medida simultaneamente com os fluxos. A equação do balanço de radiação pode ser reescrita do seguinte modo:

$$R_n' = R_g + L_d - \epsilon \sigma T_c^4 \quad (6)$$

na qual R_n' é o saldo de radiação com a parte inferior do instrumento isolada, R_g é a radiação solar global incidente, T_c é a temperatura da superfície da cavidade preta (K) e ϵ emissividade da superfície. Logo:

$$L_d = R_n' - R_g + \epsilon \sigma T_c^4 \quad (7)$$

Para a análise dos termos do balanço de radiação na pastagem, calcularam-se médias horárias do saldo de radiação (R_n), radiação solar incidente (R_g), radiação solar refletida (R_{gr}), radiação de onda longa da atmosfera (L_d) e radiação de onda longa emitida pela superfície (L_u), em condições de céu claro. Estes dias foram selecionados do conjunto total

de dados (de abril a julho de 1993), em que a razão entre a radiação solar incidente (R_g) e a radiação solar extraterrestre (R_{g0}) integradas ao longo do dia foi superior a 0,5 ($R_g/R_{g0} > 0,5$). As situações em que R_g/R_{g0} foi inferior a 0,3 foram classificadas como dias nublados (Tabela 1). Este procedimento foi utilizado pois as nuvens são fortes emissores de radiação de ondas longas.

A análise da performance das fórmulas empíricas em representar o fluxo de radiação de ondas longas da atmosfera é realizada através de parâmetros usuais de estatística, tais como Erro Médio Absoluto (EMA), Desvio Médio Quadrático (DMQ), Coeficiente de Determinação (R^2) e média aritmética.

Resultados e discussão

A Figura 3 mostra a variação média horária dos componentes medidos do balanço de radiação na pastagem durante 10 dias de céu claro. Os componentes do balanço de radiação apresentam um ciclo diário bem definido, onde nota-se que R_n , R_{gr} , L_d e L_u acompanham a variação de R_g durante o dia, sendo que os valores máximos da R_g , R_{gr} e L_u ocorrem às 12HL (hora local), chegando a 754 Wm^{-2} , 135 Wm^{-2} e 487 Wm^{-2} , respectivamente. Por outro lado, o valor máximo de R_n (609 Wm^{-2}) se observa às 13HL e o da L_d (477 Wm^{-2}) às 16HL. Durante o período diurno, o saldo de radiação (R_n) é dominado pelas trocas radiativas de ondas curtas (R_g e R_{gr}), e o coeficiente de reflexão (albedo) governa o saldo recebido de R_g . No período noturno, o saldo de radiação é composto exclusivamente pelos fluxos de ondas longas (L_d e L_u), cujas perdas na superfície são controladas

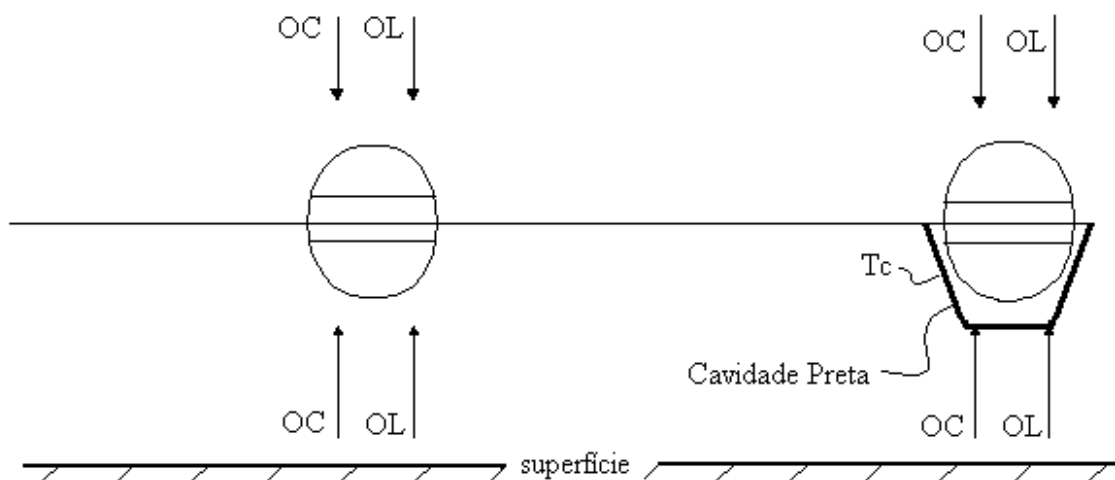
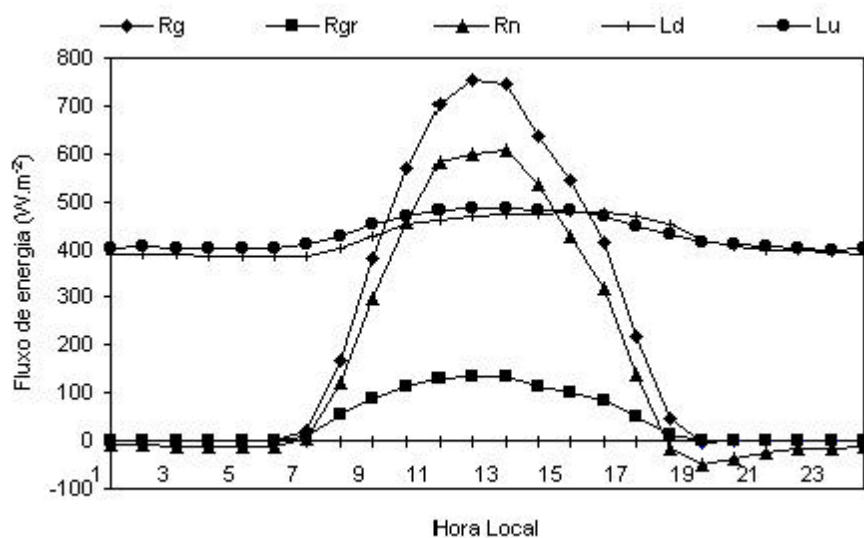


Figura 2 Diagrama esquemático do saldo radiômetro com e sem a parte inferior do sensor isolado por uma cavidade preta.

Tabela 1. Valores integrados diurnos da radiação da solar incidente (R_g) e da radiação solar extraterrestre (R_{g0}), para dias selecionados durante o período de céu claro (CC) e de céu nublado (CN).

Dia CC	R_{g0} MJm ⁻²	R_g MJm ⁻²	R_g/R_{g0}	Dia CN	R_{g0} MJm ⁻²	R_g MJm ⁻²	R_g/R_{g0}
140	34,5	20,5	0,59	120	36,9	12,0	0,33
142	34,3	18,2	0,53	121	36,8	9,4	0,25
146	33,9	18,9	0,56	123	36,5	10,4	0,28
166	32,7	18,3	0,56	125	36,3	5,2	0,14
167	32,6	19,4	0,59	135	35,0	9,3	0,27
168	32,6	18,7	0,57	136	34,9	10,2	0,29
172	32,6	18,8	0,58	160	32,9	10,1	0,31
175	32,5	18,9	0,58	161	32,8	5,4	0,16
176	32,6	19,5	0,60	162	32,8	5,4	0,16
177	32,6	18,9	0,58	169	32,6	7,1	0,22
Média	33,1	19,0	0,57		34,8	8,5	0,24

pela temperatura e pela emissividade da superfície. O balanço de ondas longas (L_d-L_u) é positivo no intervalo entre 16 e 20HL e negativo no restante do tempo. Isto significa que a atmosfera está emitindo mais energia radiante neste horário, o que pode estar associado com a profundidade e aquecimento da camada limite atmosférica. Segundo FISCH (1996), a Camada Limite Atmosférica (CLA) na área de pastagem na Amazônia é tipicamente da ordem de 2200m ao final do período diurno. A energia média diurna integrada de R_g durante o período de céu claro foi igual a 18,8MJm⁻², a de R_n foi de 14,7MJm⁻², a de R_{gr} igual a 3,7MJm⁻², seguida da L_d , com valor médio de 19,5MJm⁻² e da L_u com 19,9MJm⁻².

**Figura 3.** Variação média horária dos componentes do balanço de radiação: radiação solar global incidente (R_g), radiação solar refletida (R_{gr}), saldo de radiação (R_n), radiação de onda longa da atmosfera (L_d) e radiação de onda longa emitida pela superfície (L_u), durante o período de 10 dias de céu claro

A Figura 4 mostra a variação média horária de L_d observada em dias de céu claro e nublado. Nota-se que o ciclo diário apresenta-se bem definido nos dois períodos, com os maiores valores registrados de L_d ocorrendo durante os dias de céu claro (a partir das 08 HL até o início da noite). Do período noturno até o início da manhã, os valores de L_d apresentam-se quase semelhantes, em ambos os períodos. Esta diferença pode estar relacionada às diferentes quantidades presentes de vapor d'água, dióxido de carbono, ozônio e aerossóis na atmosfera, os quais exercem influência direta sobre a emissividade da atmosfera, durante esses horários, conforme sugerido por MENDONÇA et al. (1996). Por outro lado, esperava-se

obter valores mais elevados de L_d em dias nublados, já que as nuvens são as maiores contribuidoras de L_d para a superfície, pois irradiam como corpo negro ($\epsilon \approx 1$) a partir da base das nuvens (ARYA, 1988). Os máximos valores de L_d são observados às 16HL no período de céu claro com 477Wm⁻² e às 15HL no período nublado com 430 Wm⁻², sendo que a maior diferença verificada entre os dois períodos ocorre às 16HL (51,6Wm⁻²).

O fluxo médio diário de radiação de onda longa durante o período de céu claro foi 423Wm⁻², superior ao do período de céu nublado que apresentou um valor médio igual a 405,8 Wm⁻². Estes resultados estão coerentes com aqueles obtidos por

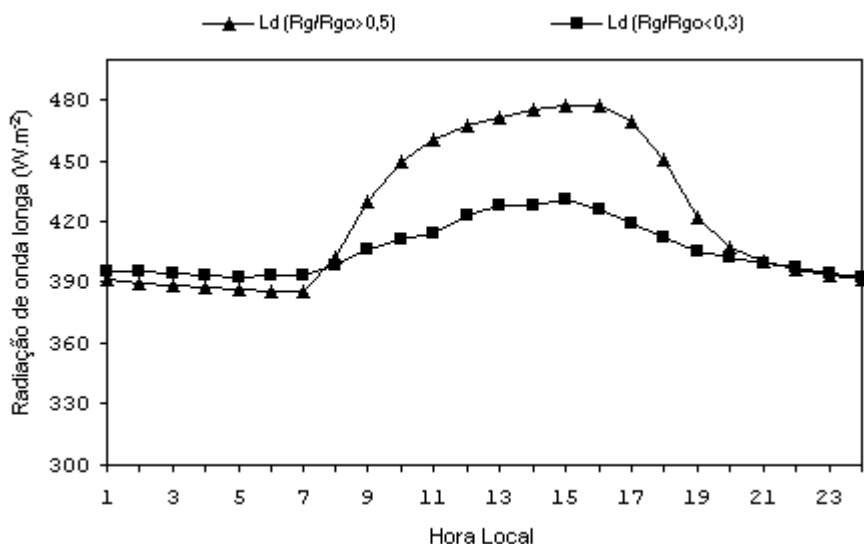


Figura 4. Variação média horária da radiação de onda longa da atmosfera (L_d) durante o período de 10 dias de céu claro e de 10 dias de céu nublado.

SHUTTLEWORTH et al. (1984), igual a 412 Wm^{-2} , considerando apenas seis dias de medidas contínuas dos componentes do balanço de radiação no mês de setembro de 1983 na Reserva Florestal Ducke. BASTABLE et al. (1993) obtiveram, a partir do balanço de radiação de ondas longas para a Reserva Ducke, valores médios diários de L_d iguais a $411,1 \text{ Wm}^{-2}$ e $418,2 \text{ Wm}^{-2}$ para períodos das estações seca (12 a 21/10/90) e chuvosa (1 a 10/12/90), respectivamente. Ressalta-se que no primeiro caso, os valores foram calculados como resíduos do balanço de radiação e no segundo estimados pelo valor da temperatura do ar obtida em abrigo meteorológico ($L_u \equiv \sigma T_{\text{abrigo}}^4$) e não a partir de medidas diretas, como é o caso deste estudo.

Em geral, as equações testadas subestimaram a L_d medida (Figura 5). Isto pode estar relacionado aos coeficientes utilizados nessas equações, os quais são específicos para os locais onde foram desenvolvidos, diferentes das condições ambientes encontradas nas áreas de pastagem na Amazônia.

Na Tabela 2 são apresentados os valores calculados do coeficiente de determinação (R^2), desvio médio quadrático (DMQ) e o erro médio absoluto (EMA) para o período de 10 dias de céu claro. Os coeficientes de correlação indicam uma boa relação entre os valores calculados e os valores medidos de L_d ($R^2 = 0,992$). Estas equações empíricas geraram valores elevados de DMQ ($50,7$ a $75,2 \text{ Wm}^{-2}$), assim como valores negativos de EMA ($-73,0$ a $-49,1 \text{ Wm}^{-2}$), o que demonstra que independentemente das considerações representadas em cada equação, todas

apresentaram resultados inferiores aos esperados para a área de pastagem na região da Amazônia. Isto pode ser devido aos altos valores de concentração de vapor d'água na atmosfera que contribuem para a emissão de ondas longas.

Para ilustrar o efeito de L_d estimada pelas equações empíricas sobre o balanço de radiação à superfície, calculou-se o fluxo do saldo de radiação (R_n) horário para os dias de céu claro. Em seguida, calculou-se a energia média diurna integrada de R_n , obtida a partir das estimativas. Os resultados estão também ilustrados na Tabela 2 juntamente com o erro expresso em porcentagem de R_n medido.

Estes valores confirmam as conclusões de CULF & GASH (1993), de que a utilização de equações empíricas com seus coeficientes originais para o cálculo da L_d podem conduzir a substanciais erros no cálculo da energia média diurna integrada de R_n . Estes autores encontraram erros percentuais de -44% (BRUNT, 1932), 58% (SWINBANK, 1963), 72% (IDSO & JACKSON, 1969), 27% (SATTLERLUND, 1979) e -18% (BRUTSAERT, 1975) no cálculo do R_n integrado nas condições atmosféricas da estação seca do deserto de Sahel na Nigéria.

A Figura 6 mostra a variação média de L_d medida e estimada pelas equações empíricas. Os valores estimados apresentam-se abaixo daqueles medidos ao longo do ciclo diário. No período diurno, a L_d estimada pela equação 1 (BRUNT, 1932) apresentou maior diferença dentre as equações testadas ($102,3 \text{ Wm}^{-2}$) em relação à L_d medida, enquanto que a equação 3 (IDSO & JACKSON, 1969) apresentou a menor diferença ($60,2 \text{ Wm}^{-2}$). Isto demonstra que, durante o dia, as equações que são funções da temperatura (Equação 2 e 3) apresentam valores mais próximos dos valores medidos. Já no período noturno ocorre o inverso: a equação 2 (SWINBANK, 1963) apresentou a diferença mais elevada ($57,5 \text{ Wm}^{-2}$), enquanto a menor diferença foi verificada com as equações 4 (SATTLERLUND, 1979) e 5 (BRUTSAERT, 1975) com valores de $38,1$ e $39,9 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente, as quais são funções da temperatura e da pressão de vapor.

Visando determinar um ajuste das equações empíricas às condições locais, realizou-se a aná-

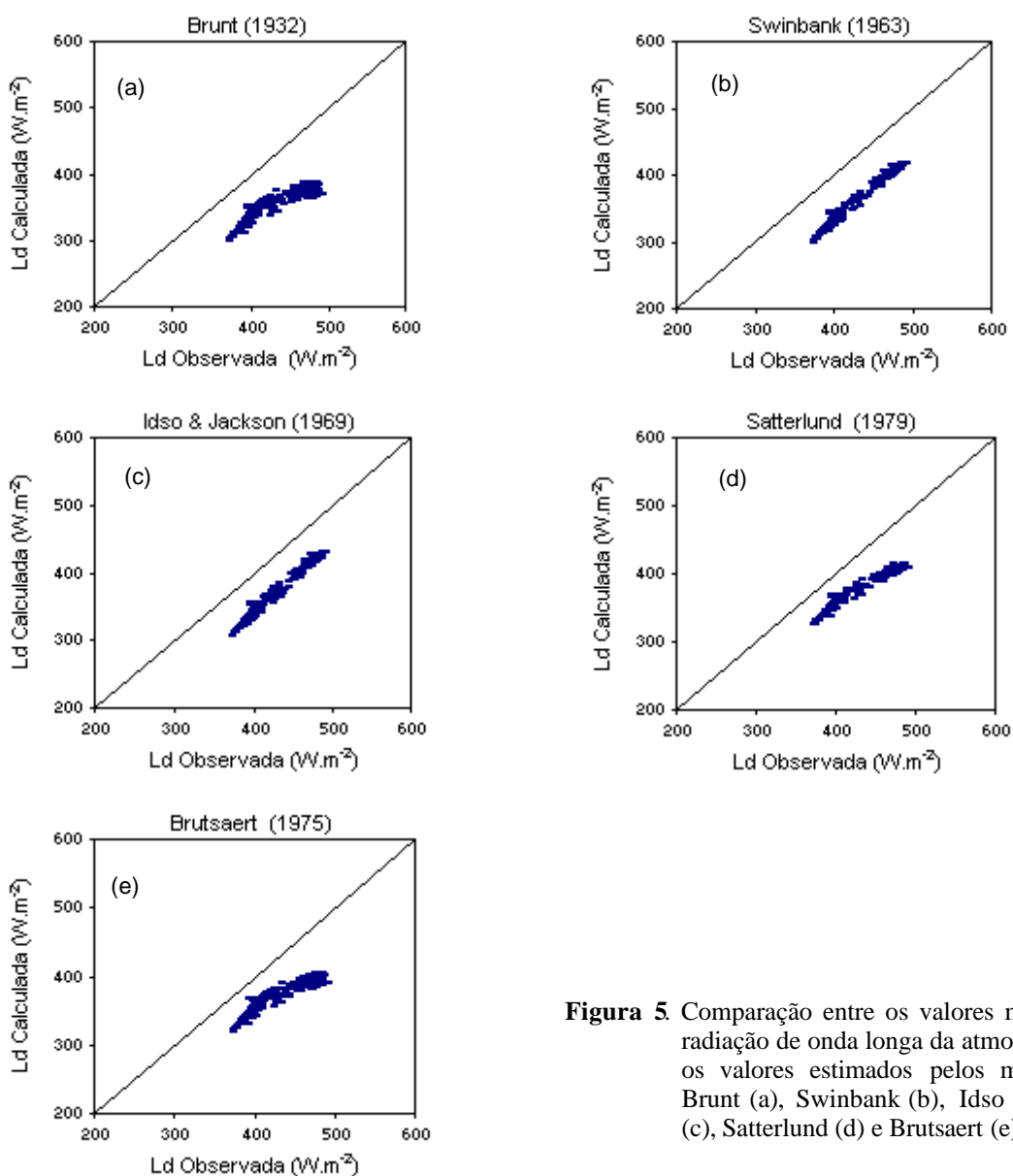


Figura 5. Comparação entre os valores medidos de radiação de onda longa da atmosfera (L_d) e os valores estimados pelos modelos de Brunt (a), Swinbank (b), Idso & Jackson (c), Satterlund (d) e Brutsaert (e).

lise de correlação entre a emissividade da atmosfera (ϵ_a), obtida a partir do cálculo de $L_d/\sigma T^4$, e as variáveis utilizadas nas equações empíricas. Para isso,

Tabela 2. Resultados estatísticos das equações empíricas com os coeficientes originais e os diferentes efeitos das estimativas de L_d sobre a energia média diurna integrada do saldo de radiação (R_n) durante o período de céu claro.

Método	Equação	R^2	DMQ MJm ⁻²	EMA MJm ⁻²	ΣR_n MJm ⁻²	Erro (%)
R_n medido	-	-	-	-	14,7	-
Brunt	1	0,922	75,2	-73,0	11,0	-25
Swinbank	2	0,991	64,6	-64,3	11,9	-19
Idso & Jackson	3	0,991	54,7	-54,5	12,4	-16
Satterlund	4	0,978	50,7	-49,1	12,1	-18
Brutsaert	5	0,940	57,9	-55,4	11,7	-20

R^2 : Coeficiente de Determinação; DMQ: Desvio Médio Quadrático; EMA: Erro Médio Absoluto e erro percentual (%).

foram selecionadas duas equações onde a radiação de onda longa é função da temperatura e da pressão de vapor (BRUNT, 1932 e BRUTSAERT, 1975) e outras duas expressões onde L_d é função somente da temperatura (SWINBANK, 1963 e IDSO & JACKSON, 1969). A equação de SATTERLUND (1979) também possui a L_d em função da temperatura e da pressão de vapor, porém as duas primeiras equações apresentaram-se mais simples na determinação do ajuste dos coeficientes empíricos às condições locais.

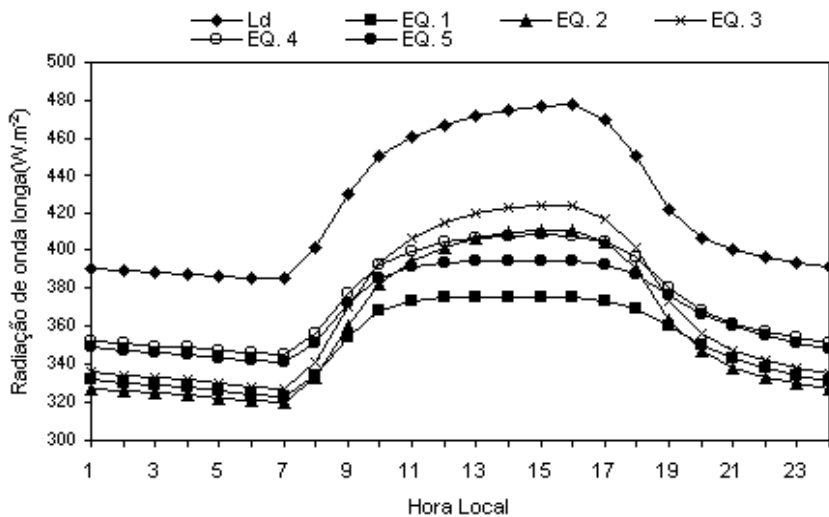


Figura 6. Variação média horária da radiação de onda longa da atmosfera medida (L_d) e estimada pelos modelos de Brunt (equação 1), Swinbank (equação 2), Idso & Jackson (equação 3), Satterlund (equação 4) e Brutsaert (equação 5) durante o período de 10 dias de céu claro.

SWINBANK (1963) estabeleceu, inicialmente, uma regressão entre o logaritmo da radiação de ondas longas incidente e o logaritmo da tem-

peratura de bulbo seco. O ajuste dos coeficientes empíricos às condições de pastagem na Amazônia foi realizado através da análise de regressão linear entre o $\text{Log}(\epsilon_a)$ e $\text{Log}(T)$ com a temperatura do ar em K, do mesmo modo que o realizado por MENDONÇA et al. (1996). No modelo de IDSO & JACKSON (1969), as variáveis utilizadas na regressão linear foram $\text{Ln}(1-\epsilon_a)$ e T^2 , com a temperatura em $^{\circ}\text{C}$. Nos modelos de BRUNT (1932) e de BRUTSAERT (1975), a variável dependente foi ϵ_a e a variável independente foi a pressão de vapor (e).

A Figura 7 apresenta o ajuste local dos coeficientes das equações empíricas, ilustradas na Tabela 3. Os melhores ajustes foram obtidos para os modelos de SWINBANK (1963) e de IDSO & JACKSON (1969), em que a emissividade é função somente da tempera-

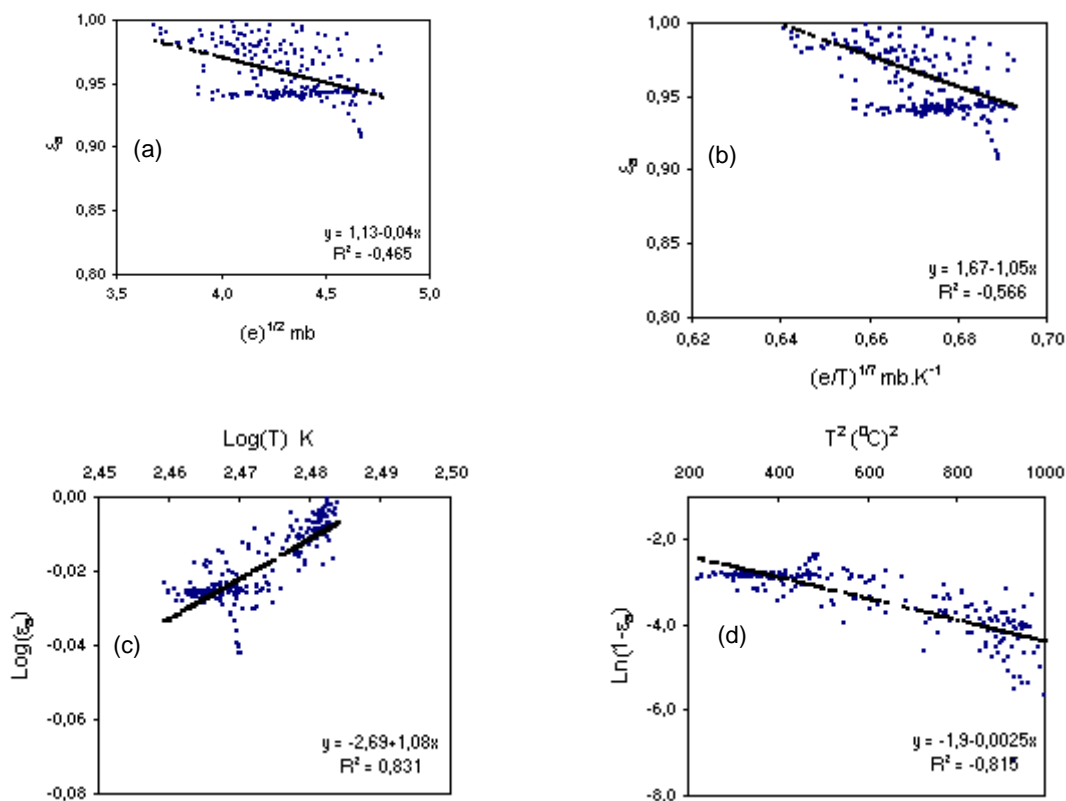


Figura 7. Ajuste local dos coeficientes dos modelos de Brunt (a), Brutsaert (b), Swinbank (c) e Idso & Jackson (d) a partir dos dados horários medidos durante 10 dias de céu claro.

Tabela 3. Equações empíricas com os coeficientes ajustados às condições de pastagem na Amazônia.

Método	Equações ajustadas
Brunt	$L_d = \sigma T^4 [1,13 - 0,04(e)^{1/2}]$
Swinbank	$L_d = \sigma T^4 [10^{(2,69 + 1,08 \log T)}]$
Idso & Jackson	$L_d = \sigma T^4 [1 - \exp(-1,9 - 0,0025(273 - T)^2)]$
Brutsaert	$L_d = \sigma T^4 [1,67 - 1,05(e/T)^{1/7}]$

tura do ar. Os modelos de BRUNT (1932) e BRUTSAERT (1975) forneceram menores coeficientes de determinação. Observou-se também nos modelos de BRUNT (1932) e de BRUTSAERT (1975), uma fração de dados que têm comportamentos discrepantes em relação ao ajuste obtido. Estes podem estar associados aos valores noturnos de emissividade da atmosfera, que não apresentaram variações acentuadas como as observadas no período diurno.

A Tabela 4 mostra a influência das estimativas de L_d sobre o balanço de radiação (com os coeficientes ajustados às condições locais de pastagem na Amazônia). Nota-se que os índices estatísticos das equações ajustadas, tais como o coeficiente de determinação (R^2), apresentam valores próximos da unidade. Quanto ao desvio médio quadrático (DMQ), os dados indicam que houve uma sensível melhora em relação à Tabela 2 com pequenos desvios dos valores estimados em relação aos valores medidos. Entretanto, o erro médio absoluto aproxima-se bastante de zero, exceto para a equação 5 que apresentou o valor mais elevado. Os diferentes efeitos das estimativas de L_d calculada com os coeficientes ajustados, sobre R_n também estão ilustrados na Tabela 4. Observa-se que os valores médios diurnos integrados de R_n estimados apresentam-se próximo do valor medido, com pequenos erros percentuais negativos, ou seja, valores estimados inferiores aos observados.

Tabela 4. Resultados estatísticos das equações empíricas com coeficientes ajustados e os diferentes efeitos das estimativas da radiação de ondas longas da atmosfera (L_d) sobre a energia média diurna integrada do saldo de radiação (R_n) durante o período de céu claro.

Método	Equação	R^2	DMQ MJm ⁻²	EMA MJm ⁻²	ΣR_n MJm ⁻²	Erro (%)
R_n medido	-	-	-	-	13,7	-
Brunt	1	0,993	8,2	-0,26	13,3	-2,0
Swinbank	2	0,992	5,1	-0,80	13,5	-1,0
Idso & Jackson	3	0,990	5,8	0,91	13,6	-0,2
Satterlund	4	0,992	7,8	2,33	13,5	-0,9
Brutsaert	5					

R^2 : Coeficiente de Determinação; DMQ: Desvio Médio Quadrático; EMA: Erro Médio Absoluto e erro percentual (%).

Conclusões

Os componentes do balanço de radiação apresentam um ciclo diário bem definido com os valores mais elevados ocorrendo durante o período diurno e os menores durante o período noturno. Durante o período diurno, o saldo de radiação é dominado pelas trocas radiativas de ondas curtas (R_g e R_{gr}), e o coeficiente de reflexão (albedo) governa o saldo recebido de R_g . No período noturno, o R_n é composto exclusivamente pelos fluxos de ondas longas (L_d e L_u), cujas perdas na superfície são controladas pela temperatura da superfície e pela emissividade.

As estimativas de L_d a partir dos modelos de BRUNT, 1932; SWINBANK, (1963); IDSO & JACKSON, (1969); SATTERLUND, (1979) e BRUTSAERT, (1975), foram subestimadas em comparação a L_d medida. O efeito da L_d estimada pelas equações empíricas mostra que pode conduzir a substanciais erros no cálculo da energia integrada do saldo de radiação (da ordem de 40 a 50%).

No ajuste local dos coeficientes das equações empíricas obtém-se, melhores estimativas de L_d com os modelos de SWINBANK (1963) e de IDSO & JACKSON (1969), pois estes modelos possuem a emissividade como função somente da temperatura do ar. Os índices estatísticos das equações ajustadas mostram coeficientes de determinação (R^2) próximos da unidade, pequenos valores de erro médio quadrático (EMQ) e erro médio absoluto (EMA) próximos de zero.

Os fluxos de superfície e as estimativas de radiação de onda longa da atmosfera podem auxiliar na calibração dos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs). Estes modelos requerem parametrizações realísticas de muitos processos de superfície (como a partição de energia), que são características importantes na determinação dos campos de temperatura, de vento, de umidade e de precipitação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à todos os colegas brasileiros e britânicos envolvidos no Projeto ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study), em especial à Ivan R. Wright (Institute of Hydrology), por

seu esforço na coleta dos dados de radiação de ondas longas. José Alexandre da Costa Galvão agradece à CAPES pela bolsa de Mestrado no INPE (1996-97) e Gilberto Fisch agradece ao CNPq (300564/96-1) por suportar financeiramente esta bolsa produtividade em pesquisa.

Referências bibliográficas

- ANDRÉ, R.G.B., SILVA FILHO, V.P., MOLION, L.C.B., et al. Balanço de radiação sobre a Floresta Amazônica (Estações seca e úmida). **Rev. Bras. Meteorologia**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 269-274, 1988.
- ARYA, S.P.S. **Introduction to micrometeorology**. London : Academic Press, Inc. 1988. 307 p.
- BASTABLE, H.G., SHUTTLEWORTH, W.J., DALLAROSA, ?. et al. Observation of climate, albedo and surface radiation over cleared and undisturbed Amazonian forest. **Int. J. of Climatol**, Chicester, v. 13, n. 7, p. 783-796, 1993.
- BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. **Quart. J. R. Meteorol. Soc.**, London, v. 58, p. 389-418, 1932.
- BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. **Water Resources Research**, Washington, v. 11, n. 5, p. 742-744, 1975.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1982. 299 p.
- CULF, A., ESTEVES, J.L., MARQUES FILHO, A.O., et al. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture Amazonian. In: GASH, J.H., NOBRE, C.A., ROBERTS, J.M. et al., eds. **Amazonian Deforestation and Climate**, Chicester : J. Willey & Sons, 1996. p. 175-191.
- CULF, A.D., GASH, J.H.C. Longwave radiation from clear skies in Niger: a comparison of observations with simple formulas. **J. of App. Meteorol.**, Boston, v. 32, p. 539-547, 1993.
- FEITOSA, J.R.P. **Balanço de energia e evapotranspiração em áreas de pastagem e de floresta densa na Amazônia central**. Campina Grande : UFPb, 1993. 95 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, 1996.
- FERREIRA DA COSTA, R., FEITOSA, J.R.P., FISCH, G, et al. Variabilidade diária da precipitação em regiões de floresta e de pastagem na Amazônia. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 28, n. 4, p. 395-408, 1998.
- FISCH, G. **Camada limite Amazônica: aspectos observacionais e de modelagem**. São José dos Campos : INPE, 1995. 171 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- GASH, J. H., NOBRE, C. A., ROBERTS, J. M., et al An overview of ABRACOS. In: GASH, J.H., NOBRE, C.A., ROBERTS, J.M. et al., eds. **Amazonian Deforestation and Climate**. Chicester : John Willey & Sons, 1996. p. 1-14.
- IDSO, S.B., JACKSON, R.D. Thermal radiation from atmosphere. **Journal Geophysical Research**, Washington, v. 74, n. 23, p. 5397-5403, 1969.
- LEITÃO, M.M.V.B. **Balanço de radiação em três ecossistemas da floresta Amazônica: campina, campinarana e mata densa**. São José dos Campos : INPE, 1994. 153 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1994.
- MANZI, A.O., VISWANADAM, Y, SÁ, L.D.A., et al. Um estudo sobre o balanço de radiação da Floresta Amazônica. Workshop on GTE/ABLE-2A, INPE, São José dos Campos, Jul. de 1986.
- MENDONÇA, E.D., CAMPELO JÚNIOR, J.H., PRIANTE FILHO, N. Estimativa de emissividade atmosférica em Santo Antônio do Laverger-MT. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, n. 4, p. 63-71, 1996.
- RESCHKE, G.A. **Influência do desmatamento no balanço de radiação e nos fluxos de calor sensível e calor latente em Ji-Paraná, Rondônia**. Viçosa : UFV, 1996. 51 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- RIBEIRO, J.B.M. **Análise comparativa das características microclimáticas entre áreas de floresta e de pastagem na Amazônia**. Viçosa : UFV, 1994. 67 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- SÁ, L.D.A., VISWADNADHAN, Y, MANZI, A.O. Energy flux partitioning over the Amazon forest. **Theoretical and App. Climatol**, Amsterdam, v. 1, n. 39, p. 1-16, 1988.
- SATTERLUND, D.R. An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere. **Water Resources Res.**, Washington, v. 15, n. 6, p. 1649-1650, 1979.
- SHUTTLEWORTH, W.J., GASH, J.H.C., LLOYD, C.R., et al. Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. **Quart. J. R. Meteorol. Soc.**, London, v. 110, n. 466, p. 1143-1162, 1984.
- SWINBANK, W. C. Long-wave radiation from clear skies. **Quart. J. R. Meteorol. Soc.**, London, v. 89, p. 339-348, 1963.

